بررسی اثرات تلفیق قطرات در جریان‌های بخار چگالشی *

اسماعیل لکزیان[۱]   سیما شعبانی[۲]

چکیده *جریان‌های چگالشی درون نازل‌ها و پره‌های توربین‌های بخار همواره موضوع بسیاری از پژوهش‌ها می‌باشد. ایجاد فاز مایع در جریان بخار باعث تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در جریان می‌گردد. آزاد شدن ناگهانی گرمای نهان در جریان مافوق‌صوت بخار به‌علت جوانه‌زایی قطرات مایع و تغییر فاز باعث ایجاد پدیدهٔ مهم شوک چگالش یا میعان می‌شود. مدل‌سازی این‌گونه جریان‌ها که بخار به‌علت خارج شدن از حالت تعادل، ابتدا مافوق سرد و سپس به فاز مایع تبدیل می‌شود، بسیار پیچیده است و عدم قطعیت‌های متعددی کماکان وجود دارد. یکی از مواردی که می‌تواند مدل‌سازی این‌گونه جریان‌های دوفازی را کامل کند، بحث تلفیق یا چسبیدن قطرات مایع می‌باشد که در این تحقیق مدل تلفیق مناسب به‌روش تحلیلی (ریاضی) یک‌بعدی آدیاباتیک برای اولین بار اضافه می‌شود. در کانال‌های هم‌گرا- واگرای مافوق صوت که جریان از یک منبع ساکن به‌صورت یونیفرم (یکنواخت) منبسط می‌شود، عوامل به‌وجود آمدن تلفیق به‌مانند توربولنسی(از جمله به‌علت جوانه‌زایی و شوک میعان و ارتعاشات تجهیزات آزمایشگاهی) هر چند محدود می‌توانند وجود داشته باشند. در این تحقیق پدیدهٔ تلفیق با استفاده از مدل پرینس و بلنچ در سه نازل هم‌گرا- واگرا شبیه‌سازی می‌شود. نسبت فشار و شعاع قطره در هر سه نازل با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند و اعتبارسنجی انطباق خوبی را نشان می‌دهد. به‌طوری که در هر سه نازل با در نظر گرفتن تلفیق، شعاع قطرات نسبت به حالت بدون تلفیق افزایش یافته و به مقادیر تجربی نزدیک‌تر شده است.*

واژه‌های کلیدی جریان‌های چگالشی، تلفیق، نازل هم‌گرا–واگرا، شعاع قطرات.

Investigation of the Effects of Droplet Coalescence on the Wet Steam Flows

E. Lakzian   S. Shaabani

Abstract *Condensing flows in nozzles and blades of steam turbines have always been the subject of many studies. Creation of liquid phase in vapor causes significant changes in the flow. Sudden release of latent heat in supersonic steam flow due to nucleation of liquid droplets and phase change causes the important phenomenon of condensation shock. Modeling of such flows is complex because the vapor gets out of equilibrium and becomes super-cooled then turns into liquid phase. However, there are still many uncertainties. One of the items that can complete the modeling of such flows is coalescence or combination of liquid droplets. A suitable coalescence model is added to the adiabatic 1D analytical method for the first time in this research. In supersonic convergent- divergent nozzles which the flow expands from a static source uniformly, there are factors of occurring coalescence like turbulence but they are limited. In this research, coalescence is simulated in three converging- diverging nozzles by using Prince & Blanch's model. Pressure ratio and droplet radius are compared with experimental result and showing a good agreement. Considering coalescence in these three nozzles shows that the radius of droplets are increased and approaching to experimental data.*

Key Words Condensing flows, Coalescence, Convergent-divergent nozzle, Radius of droplets

---

★تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۳/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۱/۳۰ می‌باشد.

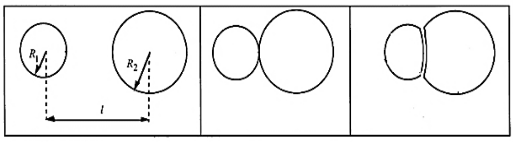
(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری. es.lakzian@gmail.com

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری.

مقدمه

هم‌زمان با پیشرفت توربین‌های بخار و استفاد وسیع‌تر از آن‌ها، پدیدهٔ چگالش و حضور فاز مایع در طبقات کم‌فشار توربین تبدیل به یکی از مشکلات اساسی در طراحی و بهره‌برداری شده است [1, 2]. ایجاد فاز مایع در توربین باعث خساراتی از جمله خوردگی و فرسایش پره‌های توربین، کاهش راندمان توربین و تغییر مشخصه‌های آیرودینامیکی و ترمودینامیکی جریان می‌شود. بنابراین بررسی چنین جریان‌هایی امری لازم می‌باشد [3, 4, 5]. عمدهٔ این تغییرات در اثر وقوع چهار پدیدهٔ اصلی جوانه‌زایی، رشد قطرات، تلفیق قطرات و شکست قطرات است. تاکنون در مطالعات جریان چگالشی فقط پدیده‌های جوانه‌زایی و رشد قطرات مورد بررسی قرار گرفته‌اند [6, 7].

از آن‌جا که به‌دلیل کوچک بودن اندازهٔ قطرات امکان وقوع پدیدهٔ شکست قطرات در چنین جریان‌هایی بسیار کاهش می‌یابد، در این مقاله فقط پدیدهٔ تلفیق بررسی می‌شود. تلفیق پدیده‌ای است که در آن دو یا تعداد بیشتری از ذرات با هم ترکیب می‌شوند و یک ذرهٔ بزرگ‌تر را به‌وجود می‌آورند [8]. پدیدهٔ تلفیق بین دو ذره در شکل (۱) ارائه شده است.



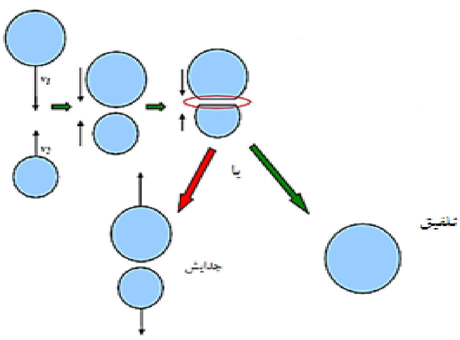
شکل ۱ نزدیک شدن و تغییرشکل دو ذره طی پدیدهٔ تلفیق

تغییرات زمانی تراکم تعداد ذرات در یک سیستم با معادلهٔ معروف موازنهٔ جمعیتی (Population Balance Equation: PBE) توصیف می‌شود. در این معادله، تغییر در توزیع تراکم ذرات به‌صورت نابودی و به‌وجود آمدن جمعیت ذرات به‌علت پدیده‌های تلفیق و شکست ظاهر می‌شود. بنابراین معادلهٔ بقا وابسته به فرکانس‌های تلفیق و شکست ذرات سیال خواهد بود [9]. مدل کردن فرکانس تلفیق ذرات بسیار دشوار است و براساس دانستن فرکانس برخورد و راندمان تلفیق می‌باشد. بدین منظور مدل‌های مختلفی برای تعیین فرکانس برخورد و راندمان تلفیق ارائه شده‌اند [9, 10, 11, 12, 13]. در تمامی این مدل‌ها، تماس و برخورد اساس تلفیق است [9].

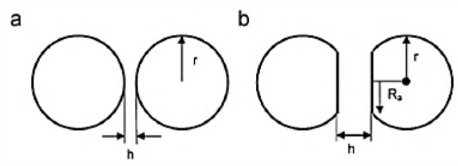
برخوردها ممکن است از حرکت تصادفی (ناگهانی) ذرات در اثر نوسانات توربولانسی نتیجه شوند که در این زمینه مدل‌های فرکانس برخورد کاریکا [14]، کولین [15]، پرینس و بلنچ [16]، ونگ [17,18] موجود هستند.

در این تحقیق از مدل فرکانس برخورد پرینس و بلنچ استفاده شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که فقط تعدادی از برخوردها منجر به تلفیق می‌شوند، درحالی که اکثر ذرات برخوردکننده بعد از برخورد از یکدیگر جدا می‌شوند [19, 20] در شکل (۲) مشاهده می‌شود که بعد از برخورد ذرات دو احتمال وجود دارد؛ تلفیق صورت بگیرد و یا از یکدیگر جدا شوند، به‌همین دلیل باید راندمان تلفیق معرفی شود.

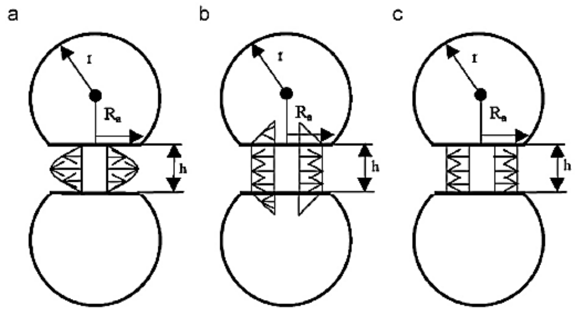
برای محاسبهٔ راندمان تلفیق، مدل تخلیهٔ فیلم ارائه شده است. براساس نظریهٔ لی و هودگسان [9]، رژیم‌های مختلف تخلیهٔ فیلم بین قطرات بر مبنای سختی سطوح ذره (سطوح تغییرناپذیر و سطوح تغییرپذیر) و متحرک بودن سطوح تماس (غیرمتحرک، با تحرک جزئی، کاملاً متحرک) قابل تشخیص هستند (شکل ٤ و۳).



شکل ۲ نمایش پدیدهٔ تلفیق



شکل۳ (a) سطوح تغییرناپذیر (b) سطوح تغییرپذیر



شکل٤ (a) سطوح مشترک غیرمتحرک (b) سطوح مشترک با تحرک جزئی
(c) سطوح مشترک کاملاً متحرک

سطوح تغییرناپذیر (Non-deformable). در این حالت مدل‌های جفری و دیویس، دیویس و همکاران و چسترز موجود هستند [21, 22]. در این مدل‌ها فرض شده است که ذرات به‌صورت کره‌های سخت رفتار می‌کنند. اما در بیشتر موارد باید تغییرشکل سطح قطرات در مدت برخورد لحاظ شود، بدین منظور اکثراً سطوح ذرات تغییرپذیر (Deformable) درنظر گرفته شده‌اند و براساس متحرک بودن سطوح تماس به سه دستهٔ زیر تقسیم می‌شوند:

- ذرات تغییرپذیر با سطوح مشترک غیرمتحرک (Immobile). در این حالت تخلیهٔ فیلم فقط توسط نیروهای ویسکوز کنترل می‌شود و فیلم از بین این سطوح صلب به‌صورت یک جریان آرام خارج می‌شود. پروفیل سرعت در فیلم به‌صورت هذلولی شکل و بدون لغزش در سطح است. در این زمینه مدل‌های مک‌کای و میسون، چسترز، واگون-اسلاتری و لی موجود هستند [22, 23].
- ذرات تغییرپذیر با تحرک جزئی سطوح مشترک (Partially mobile). تقریب بدون تحرک بودن سطح فیلم فقط برای سیستم‌های با ویسکوزیته بالای فاز پراکنده قابل استفاده است. در اکثر سیستم‌ها تخلیهٔ فیلم غالباً توسط حرکت سطح فیلم کنترل می‌شود. در این زمینه مدل‌های تی‌سوریس و تاولاریدس، واگون و اسلاتری موجود هستند [24].
- ذرات تغییرپذیر با سطوح مشترک کاملاً متحرک (Fully mobile). در این حالت فرآیند تخلیه توسط نیروی اینرسی و نیروی ویسکوز کنترل می‌شود. در این زمینه مدل‌های پرینس و بلنچ، چسترز، لی موجود هستند [16, 22].

در این پژوهش به‌علت سرعت بالای قطرات، اینرسی نقش مهمی دارد و بنابراین از حالت تخلیهٔ فیلم ذرات با سطوح مشترک کاملاً متحرک و مدل پرینس و بلنچ برای محاسبهٔ راندمان تلفیق استفاده می‌شود.

معادلات حاکم

در جریان بخار مرطوب، قطرات خواص خود را در اثر

پدیـده‌هـای مختلفـی ماننـد تلفیـق(Coalescence)، شکست (Breakage)، جوانه‌زایی(Nucleation)، رشـد (Growth) تغییر مـی‌دهنـد [9]. هـدف اصـلی در ایـن پژوهش، بررسی پدیدهٔ تلفیق بین قطرات شـکل گرفتـه طی پدیده جوانه‌زایـی در نـازل‌هـای هـم‌گـرا- واگـرا به‌صورت یک‌بعدی می‌باشد. طی پدیـدهٔ تلفیـق تعـداد ذرات کاهش می‌یابـد، درحـالی کـه جـرم ثابـت بـاقی می‌ماند [8]. تغییرات زمانی تراکم تعداد ذرات در یـک سیستم با معادلهٔ معـروف موازنـهٔ جمعیتـی (PBE) کـه توسط هولبرت و کتـز توسـعه یافتـه اسـت، ایـن‌گونـه توصیف می‌شود [9, 25]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = S_b + S_c \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، N تعداد قطـرات بـر واحـد حجـم است و جملات S_b و S_c بـه‌ترتیـب تـرم‌هـای چشـمهٔ مربوط به پدیده‌های شکست و تلفیق است که در رابطهٔ (۲) ارائه شده اند:

$$S_b = \int_d^\infty m(d_i)\beta(d,d_i)\Omega(d_i)\,N(d_i,t)d(d_i)$$
$$-\Omega(d)\,N(d,t)$$
$$S_c = (\frac{1}{2}\int_0^V \lambda(V-V_1,V_1)h(V-V_1,V_1)\times$$
$$N(V-V_1,t)N(V_1,t)d(V_1)) - \qquad (۲)$$
$$(N(V,t)\times\int_0^\infty \lambda(V,V_1)h(V,V_1)\times$$
$$N(V_1,t)d(V_1))$$

در رابطهٔ (۲)، d و V به‌ترتیب قطر و حجم قطرات است و Ω فرکانس شکست، β احتمـال شکسـت، m تعداد قطرات، h فرکانس برخورد و λ رانـدمان تلفیـق می‌باشند.

پدیدهٔ تلفیق بین ذرات سـیال موضـوع بسـیاری از پژوهش‌های تئوری و تجربی در طـی دهـه‌هـای اخیـر بوده است. مـدل‌هـای مختلفـی بـرای تعیـین فرکـانس برخورد $h(V-V_1, V_1)$ و راندمان تلفیـق $\lambda(V-V_1, V_1)$ ارائه شده‌اند [9, 10, 11, 12, 13]. در ایـن پـژوهش از فرمول پرینس و بلـنچ بـرای تعیـین فرکـانس برخـورد استفاده شده است که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$h(d_1,d_2) = c_1(d_1+d_2)^2(d_1^{2/3}+d_2^{2/3})^{1/2}\varepsilon^{1/3} \qquad (۳)$$

که در رابطهٔ (۳) مقـدار c_1 در بـازهٔ (۰/۲۸–۱/۱۱) انتخاب می‌شود. هم‌چنین برای تعیین راندمان تلفیق نیز از فرمـول پـرینس و بلـنچ اسـتفاده شـده اسـت کـه به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\lambda(d_1,d_2) = \exp(-c_2\frac{\rho_c^{1/2} r_{eq}^{5/6}\varepsilon^{1/3}}{\sigma^{1/2}}) \qquad (٤)$$

در رابطهٔ (٤) مقدار c_2، ۲/۳ و ρ_c چگالی هوا، σ کشش سطحی و r_{eq} شعاع معادل قطرات می‌باشد که از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$r_{eq} = \left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)\right]^{-1} \qquad (٥)$$

در روابط (۳و ٤)، ε نرخ اتلاف انرژی اسـت و بـا استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود [26]:

$$\varepsilon = \frac{U^3}{2\sqrt{2}H} \qquad (٦)$$

که در رابطهٔ (٦)، U سـرعت سـیال و H ارتفـاع نـازل است.

چون تمام برخوردها به تلفیـق منجـر نمـی‌شـوند، مفهوم راندمان تلفیق معرفی می‌شود. بنـابراین فرکـانس تلفیـــق $\Gamma(V-V_1, V_1)$ توســـط فرکـــانس برخـــورد $h(V-V_1, V_1)$ و رانـدمان تلفیـق $\lambda(V-V_1, V_1)$ تعیـین می‌شود [9]:

$$\Gamma = h\lambda \qquad (۷)$$

روش عددی

روش عددی حل معادلات حاکم بر پدیدهٔ تلفیق. روش‌های مختلفی برای حل معادلهٔ PBE ارائه شده است. در این پژوهش فرکانس تلفیق با به‌کارگیری روش اسکات به‌صورت زیر تعریف می‌شود [27]:

$$\Gamma(V_1, V_2) = b(V_1 + V_2) \qquad (۸)$$

ابتدا تعریفی برای N(t)، تعداد کل قطرات بر واحد حجم در یک زمان مشخص با در نظر گرفتن تلفیق، ارائه می‌شود:

$$N(t) = N_0(1 - \tau) \qquad (۹)$$

در رابطهٔ (۹)، N_0 تعداد اولیهٔ قطرات بر واحد حجم است و پارامتر τ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = bN_0V_0t$$
$$\tau = 1 - e^{-T} \qquad (۱۰)$$

در رابطهٔ (۱۰)، t زمان، T زمان بی‌بعد و V_0 حجم اولیهٔ قطرات است و b با توجه به رابطهٔ (۸) این‌گونه تعیین می‌شود:

$$b = \frac{\Gamma(V_1, V_2)}{(V_1 + V_2)} \qquad (۱۱)$$

بنابراین با استفاده از رابطهٔ (۹) تعداد کل قطرات بر واحد حجم در یک زمان مشخص به‌دست می‌آید و با داشتن تعداد قطرات می‌توان شعاع آن‌ها را محاسبه کرد.

لازم به یادآوری است که در این پژوهش معادلات حاکم بر پدیده‌های جوانه‌زایی و رشد قطرات در بخار با معادلات بقا در دینامیک گاز ترکیب می‌شوند و سیستم معادلات حاصل با در نظر گرفتن معادلات حاکم بر پدیدهٔ تلفیق به‌صورت عددی حل می‌گردد [1].

روش حل معادلات اصلی دینامیک گاز

تنظیم معادلات اصلی دینامیک گاز جریان. فرض کنید جریان یکنواخت و یک‌بعدی بخار- مایع از میان المان جزئی به طول Δx در امتداد محور کانال عبور می‌کند. چنان‌چه در طول فاصله جزئی Δx سطح مقطع جریان، فشار، دانسیته بخار، درجهٔ حرارت فاز بخار و مایع، نرخ جریان جرمی بخار و مایع و سرعت فازهای بخار و مایع به‌ترتیب از: A، P، ρ_G، T_G، T_L، W_G، W_L، U_G و U_L به A+dA، P+dP، $\rho_G + d\rho_G$، T_G+dT_G، T_L+dT_L، W_G+dW_G، W_L+dW_L، U_G+dU_G و U_L+dU_L تغییر نمایند، معادلات جریان می‌توانند نوشته شوند. این معادلات با استفاده از روش استاندارد رانگ- کوتا انتگرال‌گیری می‌شوند. بنابراین حل معادلات جریان بستگی به ارزیابی W_L و dW_L دارد.

ترکیب عبارات جریان مایع با معادلات اصلی جریان. معادلات اصلی جریان با استفاده از روش رانگ - کوتا می‌توانند انتگرال‌گیری شوند. اما معادلات مربوط به W_L و dW_L در شرایط فشار و درجه حرارت ثابت بخار انتگرال‌گیری می‌شوند. در حالی که این شرایط در فاصلهٔ Δx از المان مفروض تغییر می‌کنند. بنابراین برای بالا بردن دقت محاسبات انتگرال‌گیری، مراحل زیر انجام می‌گیرد:

(۱) با فرض این‌که فشار و درجهٔ حرارت بخار ثابت و مقادیر آن‌ها برابر با P و T_G در ورود به المان مورد نظر باشد، معادلات رشد قطره انتگرال‌گیری شده و مقادیر تقریبی برای W_L و dW_L تعیین می‌شوند.

(۲) با استفاده از مقادیر تقریبی اولیه برای W_L و dW_L معادلات جریان روی المان مورد نظر انتگرال‌گیری شده و تقریب اولیه برای شرایط خروجی $(P+dP)_1$ و $(T_G+dT_G)_1$ به‌دست می‌آید.

(۳) با پذیرفتن $(P+dP)_1$ و $(T_G+dT_G)_1$ برای شرایط

متوسط بخار، معادلات رشد قطره به‌منظور تعیین مقادیر جدید W_Lو dW_L مجدداً روی المان مورد نظر انتگرال‌گیری می‌شوند.

(٤) متوسط مقادیر W_L و dW_L محاسبه شده در مراحل (١ و ٣) تعیین می‌گردد و به‌عنوان مقادیر نشان دهنده این کمیت‌ها روی المان پذیرفته می‌شوند.

(٥) با استفاده از این مقادیر معادلات جریان یک بار دیگر انتگرال‌گیری می‌شوند و مقادیر نهایی $(P+dP)$ و (T_G+dT_G) تعیین می‌شوند.

(٦) مقدار درجه حرارت قطره متناسب با شعاع آن در شرایط $(P+dP)$ و (T_G+dT_G) به‌دست آمده از مرحلهٔ فوق، محاسبه می‌شود تا اطمینان کامل از سازگاری تمام خواص در خروجی المان مورد نظر حاصل شود. سپس تمام خواص سیال و متغیرهای جریان در خروج از المان به‌عنوان شرایط اولیه آن‌ها در ورود به المان بعد محاسبه می‌شوند.

هندسه و شرایط مرزی ورودی

هندسه‌های مورد بررسی در این پژوهش نازل‌های هم‌گرا- واگرای مور نوع A و B [28] و نازل ٢ کرول [29,30] می‌باشند. شرایط مرزی ورودی برای سه نازل مذکور در جدول (١) آورده شده است.

جدول ١ شرایط مرزی ورودی [28, 29, 30]

نوع نازل	P_{0in}(kPa)	T_{0in}(K)
مور B	٢٥	٣٥٧/٦
مور A	٢٥	٣٥٤/٦
نازل ٢ کرول	٢٩٤	٤٥٣

نتایج و بحث

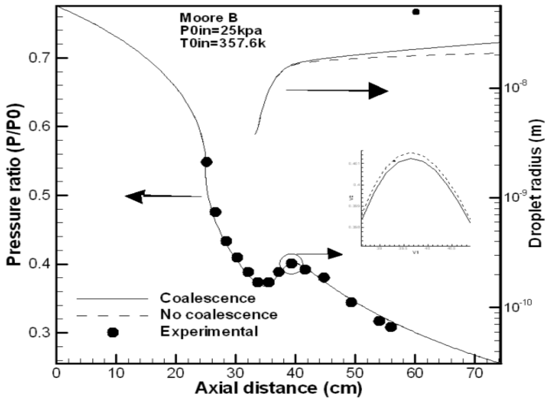
در این قسمت نتایج حل عددی برای متغیرهای مهم جریان روی خط مرکزی نازل مورد بررسی قرار می‌گیرند و نتایج حالت با تلفیق و بدون تلفیق مقایسه می‌شوند.

در شکل‌های (٧-٥) شعاع متوسط قطرات در حالت تلفیق و بدون تلفیق با مقدار تجربی [28-30] برای هر سه نازل مقایسه گردیده است. طی پدیدهٔ تلفیق دو یا تعداد بیشتری از ذرات با هم ترکیب می‌شوند و یک ذرهٔ بزرگ‌تر را به‌وجود می‌آورند، بنابراین شعاع متوسط قطرات افزایش و تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به شکل‌های (٧-٥) مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن پدیدهٔ تلفیق، شعاع متوسط قطرات نسبت به حالت بدون تلفیق به‌ترتیب به میزان ٢٥ درصد برای نازل مور B، ٥٨ درصد برای نازل مور A و ١٠ درصد برای نازل ٢ کرول افزایش یافته و به میزان تجربی نزدیک‌تر شده است.

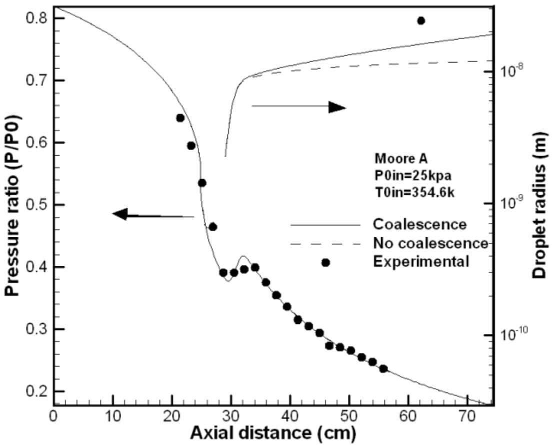
هم‌چنین در شکل‌های (٧-٥) مشاهده می‌شود که توافق مطلوبی بین نتایج عددی حاصل با داده‌های تجربی توزیع فشار و شعاع قطرات وجود دارد. لازم به یادآوری است که در نازل‌های هم‌گرا- واگرای مافوق‌صوت مورد نظر با این‌که جریان از یک منبع ساکن به‌صورت یونیفرم (یکنواخت) منبسط می‌شود با این‌حال عوامل به‌وجود آمدن تلفیق مانند توربولنسی (از جمله به‌علت جوانه‌زایی، شوک میعان و ارتعاشات تجهیزات آزمایشگاهی) می‌توانند وجود داشته باشند.

با توجه به این‌که نتایج عددی نسبت فشار و شعاع قطره برای هر سه نازل با نتایج تجربی توافق خوبی دارند و هم‌چنین به‌دلیل مشابه بودن نتایج برای هر سه نازل، در ادامه فقط نتایج مربوط به نازل مور B آورده می‌شود و باید توجه داشت که نتایج دو نازل دیگر مشابه با نتایج حاصل شده برای نازل مور B هستند.

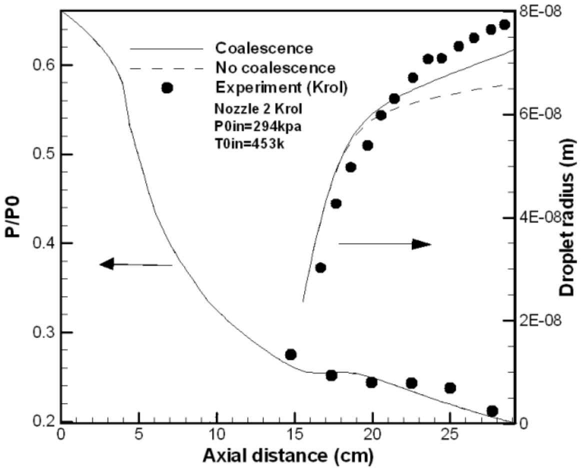
شعاع و تعداد قطرات. در شکل (٨) مشاهده می‌شود که در انتهای نازل مور B شعاع قطرات نسبت به حالت بدون تلفیق افزایش و تعداد آن‌ها نسبت به حالت بدون تلفیق کاهش می‌یابد.



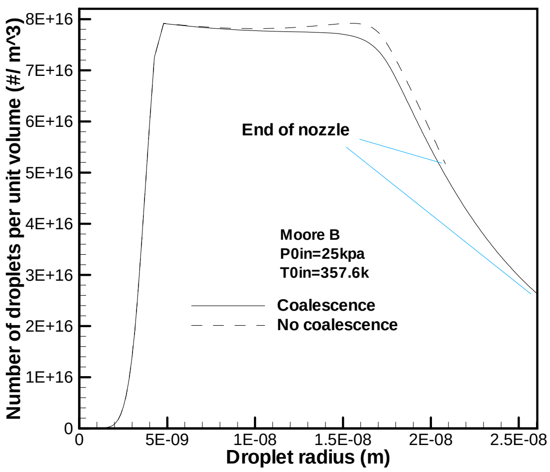
شکل ۵ توزیع فشار و شعاع متوسط قطرات در دو حالت با تلفیق و بدون تلفیق و مقایسه با حالت تجربی برای نازل مور B [28]



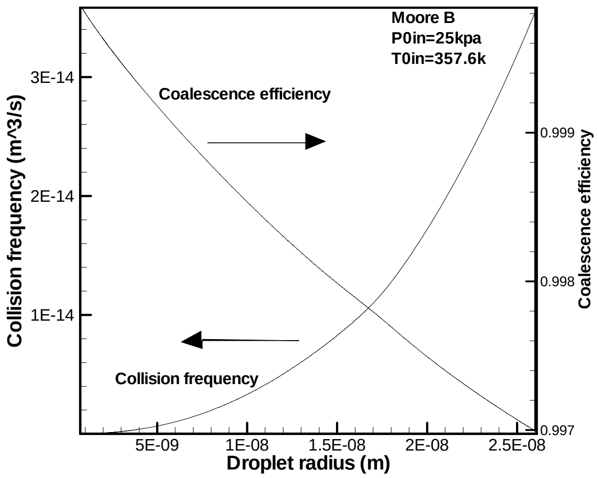
شکل ٦ توزیع فشار و شعاع متوسط قطرات در دو حالت با تلفیق و بدون تلفیق و مقایسه با حالت تجربی برای نازل مور A [28]



شکل ۷ توزیع فشار و شعاع متوسط قطرات در دو حالت با تلفیق و بدون تلفیق و مقایسه با حالت تجربی برای نازل ۲ کرول [29,30]



شکل ۸ تعداد قطرات بر واحد حجم بر حسب شعاع قطره برای دوحالت باتلفیق و بدون تلفیق برای نازل مور B [28]



شکل ۹ تغییرات فرکانس برخورد و راندمان تلفیق با شعاع قطره برای نازل مور B [28]

فرکانس برخورد و راندمان تلفیق. در این پژوهش از فرمول فرکانس برخورد پرینس و بلنچ استفاده شده است. با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع قطرات و در نتیجه کاهش فاصلهٔ متوسط بین آن‌ها، فرکانس برخورد افزایش می‌یابد. با استفاده از رابطهٔ (۳) نیز این نتیجه تأیید می‌شود.

در این پژوهش برای محاسبهٔ راندمان تلفیق، از فرمول پرینس و بلنچ استفاده شده است. با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که راندمان تلفیق با افزایش شعاع قطرات کاهش می‌یابد. با استفاده از رابطهٔ (٤) نیز این نتیجه تأیید می‌شود.

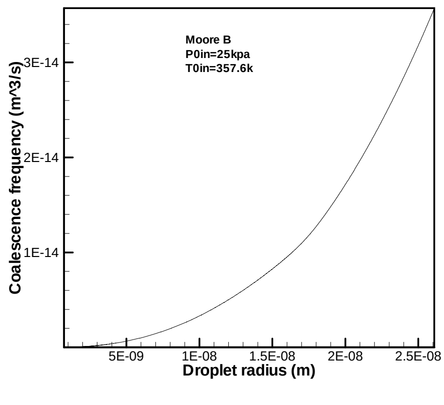
فرکانس تلفیق. از ترکیب فرکانس برخورد و راندمان تلفیق، فرکانس تلفیق به‌دست می‌آید. با توجه به رابطهٔ (۷) فرکانس تلفیق با شعاع قطرات نسبت مستقیم دارد. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش شعاع قطرات، فرکانس تلفیق افزایش یابد. شکل (۱۰) نیز این نتیجه را تأیید می‌کند. با توجه به شکل (۱۰) با افزایش شعاع قطرات، فرکانس تلفیق افزایش می‌یابد و در یک بازهٔ زمانی یکسان حجم بیشتری از قطرات (با شعاع بزرگ‌تر

نسبت بـه قطـرات بـا شـعاع کوچـک‌تـر) بـه یکـدیگر می‌چسبند و تلفیق صورت می‌گیرد. بنـابراین بـا وجـود تأثیرات کم تلفیق قطرات بـرای شـرایط اسـتفاده شـده، هنگامی که قطرات درشت‌تر باشند، اثرات تلفیـق بیشـتر اسـت و تـأثیر بیشـتری بـر روی پارامترهـای جریـان می‌گذارد.

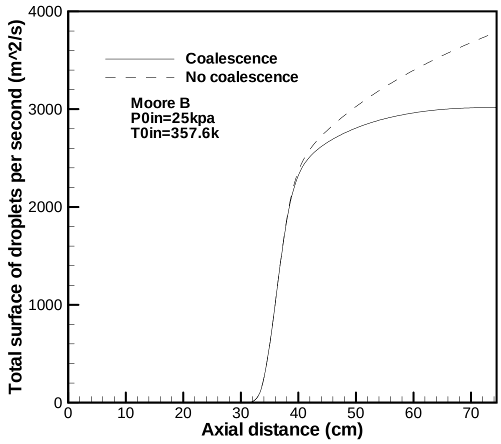
نرخ جوانه‌زایی. با درنظر گرفتن پدیـدهٔ تلفیـق سـطح مؤثر قطرات نسبت به حالت بدون تلفیق کاهش می‌یابد (شکل ۱۱). هنگامی که انرژی گیـبس سیسـتم مـاکزیمم (حداکثر ناپایداری) است؛ بخار، انرژی گیبس خود را از طریق تشکیل قطرات مایع (جوانه‌زایی و تقطیر بـر روی سطح قطرات قدیمی) آزاد می‌کند و سیسـتم بـه حالـت پایدار می‌رسد. با درنظر گرفتن تلفیق، سـطح کمتـری از قطرات قدیمی برای تقطیر در اختیار بخار قرار دارد. در نتیجه کاهش انرژی گیبس فقـط از طریـق جوانـه‌زایـی می‌باشد (تقطیر به علت سطح کوچک‌تر نقـش کـم‌تـری دارد) بنابراین نرخ جوانه‌زایی نسـبت بـه حالـت بـدون تلفیق افزایش می‌یابد اما میزان این افزایش بسیار نـاچیز است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) بزرگنمایی شده.

فشار بخار و نسبت فشار. با پایان ناحیـهٔ جوانـه‌زایـی قطرات وارد ناحیهٔ رشد قطرات (ناحیه‌ای که به‌علت کم بودن میزان جوانه‌زایی می‌توان از جوانه‌زایی صرف‌نظـر کرد) می‌شوند. مولکول‌های بخـار پـس از برخـورد بـه قطرات و تقطیر بر روی آن‌ها گرمای نهـان خـود را بـه قطرات می‌دهند. اما از آن‌جایی کـه سـطح کـل قطـرات نسبت به حالت بدون تلفیق کوچک‌تر شده است (شکل ۱۱) در بازگشت گرما به بخـار اطـراف، قطـرات تبـادل حرارتی کمتری با بخار دارند و بیشتر گرمای دریافتی را در خود نگه می‌دارند، بنابراین دمای قطرات نسـبت بـه حالت بدون تلفیق افزایش و دمای بخار کاهش می‌یابـد. هم‌چنین در جریان مافوق صوت اگـر بـه جریـان گرمـا داده شود، فشار افزایش می‌یابد (جریان رایلی) [31]. بـا در نظر گرفتن تلفیق، قطره تبادل حرارتی کمتری با بخار اطراف دارد (طبق توضـیحات بـالا) و گرمـای کمتـری نسبت به حالت بدون تلفیـق بـه جریـان داده مـی‌شـود. بنابراین طبـق جریـان رایلـی، در ناحیـهٔ بعـد از شـوک چگالش افزایش فشار در حالت تلفیق نسبت بـه حالـت بدون تلفیق کمتر است (شکل ۵).

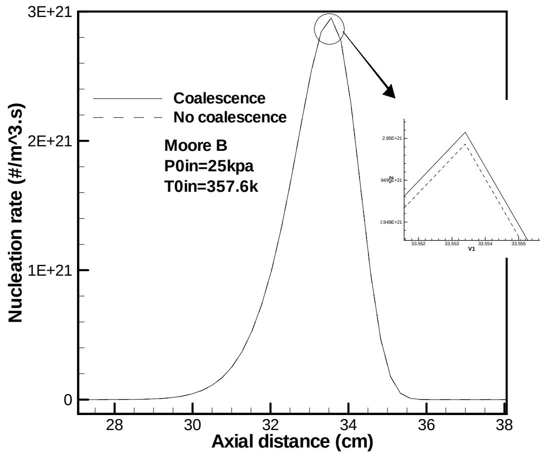
کسر رطوبت. همان‌طـور کـه در شـکل (۱۳) مشـاهده می‌شود در انتهای نازل مور B با در نظـر گـرفتن تلفیـق میزان رطوبت نسبت به حالت بدون تلفیـق ۰/۵ درصـد کاهش می‌یابد. چون در حالت تلفیق نسـبت بـه حالـت بدون تلفیق سطح مقطع کمتری بـرای رشـد در اختیـار بخار قرار دارد، بنـابراین میـزان رطوبـت کـاهش یافتـه است.



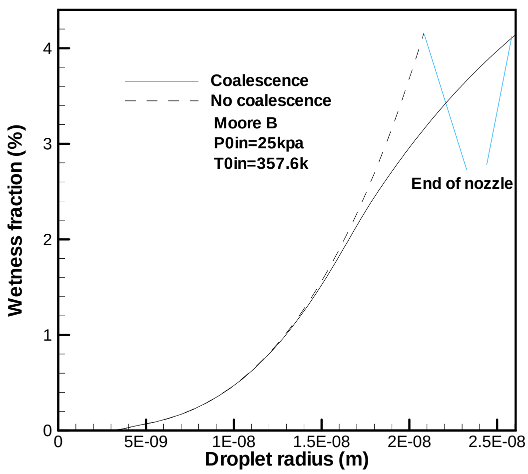
شکل ۱۰ تغییرات فرکانس تلفیق با شعاع قطره برای نازل مور B



شکل ۱۱ مقایسهٔ سطح مؤثر قطرات در دو حالت با تلفیق و بدون تلفیق برای نازل مور B



شکل ۱۲ مقایسهٔ نرخ جوانه‌زایی در دو حالت با تلفیق و بدون تلفیق برای نازل مور B



شکل ۱۳ کسر رطوبت بر حسب شعاع قطره برای دوحالت باتلفیق و بدون تلفیق برای نازل مور B

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پدیدهٔ تلفیق بین قطرات در سه نازل هم‌گرا-واگرا به روش یک‌بعدی شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل با حالت بدون تلفیق مقایسه شده‌اند. نسبت فشار و شعاع قطره در هر سه نازل با نتایج تجربی مقایسه گردید و اعتبارسنجی انطباق خوبی را نشان داد، به‌طوری که شعاع متوسط قطرات با در نظر گرفتن تلفیق نسبت به حالت بدون تلفیق افزایش می‌یابد و در نتیجه به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌شود. هم‌چنین با در نظر گرفتن تلفیق نسبت به حالت بدون تلفیق؛ تعداد قطرات، سطح مؤثر قطرات، نرخ جوانه‌زایی، شدت شوک چگالش و میزان رطوبت انتهایی به‌ترتیب کاهش، کاهش، افزایش، کاهش و کاهش می‌یابند. در شرایط این پژوهش به‌خاطر کوچک بودن شعاع قطرات اثرات تلفیق بر روی پارامترهای جریان بیشتر به‌صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در صورت درشت‌تر بودن شعاع قطرات، اثرات تلفیق بیشتر است و تغییرات بیشتری بر روی پارامترهای جریان ایجاد می‌کند. بنابراین در نظر گرفتن پدیدهٔ تلفیق و داشتن نتایج دقیق‌تر از شعاع قطره و میزان رطوبت، می‌تواند باعث بهبود طراحی پره‌های توربین و پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار جریان در این پره‌ها و اتخاذ روش‌هایی برای کاهش اتلافات گردد.

مراجع

1. Mahpeykar, M.R., Lakzian, E., Amirirad, E., "Reduction of Thermodynamic Losses in a Supersonic Nucleating Steam Nozzle by Spraying Water Droplets", Scientia Iranica, Vol. 16, pp. 253-262, (2009).
2. Bakhtar, F., Mahpeykar, M.R., "On the performance of a cascade of turbine rotor tip section blading in nucleating steam Part 3: theoretical treatment", Proc Instn Mech Engrs, Vol. 211, pp. 195-210, (1997).
3. Mahpeykar, M.R., Bakhtar, F., Abbas, K.K., "An Investigation of Nucleating Flows of Steam In a Cascade of Turbine Blading -Theoretical Treatment", Transactions of ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 117, pp. 138-144, (1995).
4. Lakzian, E., Masjedi, A., "Slip effects on the exergy loss due to irreversible heat transfer in a condensing flow", International Journal of Exergy, Vol. 14, pp. 22-37, (2014).
5. Bakhtar, F., Mahpeykar, M.R., Mashmoushy, H., "Studies of nucleating and wet steam flows in two-dimensional cascades", Journal of Mechanical Engineering Science IMechE, Vol. 218, pp. 843-858, (2004).
6. Bakhtar, F., Young, J.B., White, A.J., Simpson, D.A., "Classical Nucleation Theory and Its Application to Condensing Steam Flow Calculations", Journal of the mechanical engineering science, Vol. 219, pp. 1315-1333, (2005).
7. Gerber, A.G., "Two-Phase Eulerian/ Lagrangian Model for Nucleating Steam Flow", Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, pp. 465-475, (2002).
8. Hasan, N., Zakaria, Z., "Computational approach for a pair of bubble coalescence process", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 32, pp. 755-761, (2011).
9. Liao, Y., Lucas, D., "A literature review on mechanisms and models for the coalescence process of fluid particles", Chemical Engineering Science, Vol. 65, pp. 2851–2864, (2010).
10. Yeoh, G.H., Cheung, C.P., Tu, J.Y., "On the prediction of the phase distribution of bubbly flow in a horizontal pipe", Chemical engineering research and design, Vol. 90, pp. 40-51, (2012).
11. Mitre, J.F., Takahashi, R.S.M., RibeiroJr, C.P., Lage, P.L.C., "Analysis of breakage and coalescence models for bubble columns", Chemical Engineering Science, Vol. 65, pp. 6089–6100, (2010).

12. Crane, R.I., "Drop coalescence and deposition in turbulent wet steam pipe flows", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 3, pp. 13-20, (1982).
13. Lee, W., Son, G., "Numerical study of droplet impact and coalescence in a microline patterning process", Computers and Fluids, Vol. 42, pp. 26-36, (2011).
14. Carrica, P.M., "A polydisperse model for bubbly two-phase flow around a surface ship", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, pp. 257-305, (1999).
15. Colin, C., "Turbulence and shear-induced coalescence in gas-liquid pipe flows", Fifth International Conference on Multiphase Flow (ICMF04), Vol. 4, Japan, (2004).
16. Prince, M.J., Blanch, H.W., "Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns", AIChE Journal, Vol. 36, pp. 1485-1499, (1990).
17. Wang, T.F., "Theoretical prediction of flow regime transition in bubble columns by the population balance model", Chemical Engineering Science, Vol. 60, pp. 6199-6209, (2005).
18. Wang, T.F., "Population balance model for gas-liquid flows: Influence of bubble coalescence and breakup models", Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 44, pp. 7540-7549, (2005).
19. Su˜nol, F., Gonzalez-Cinca, R., "Rise, bouncing and coalescence of bubbles impacting at a free surface", Colloids and Surfaces A, Vol. 365, pp. 36-42, (2010).
20. Zhao, H., Brunsvold, A., Munkejord, S., "Transition between coalescence and bouncing of droplets on a deep liquid pool", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 37, pp. 1109-1119, (2011).
21. Davis, R.H., "The lubrication force between two viscous drops", Physics of Fluids A, Vol. 1, pp. 77–81, (1989).
22. Chesters, A.K., "The modeling of coalescence processes in fluid-liquid dispersions: A review of current understanding", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 69, pp. 259–270, (1991).
23. Salim, A., Colin, C., Grah, A., Dreyer, M., "Laminar bubbly flow in an open capillary channel in microgravity", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 36, pp. 707-719, (2010).
24. Tsouris, C., Tavlarides, L.L., "Breakage and coalescence models for drops in turbulent dispersions", AIChE Journal, Vol. 40, pp. 395–406, (1994).
25. Jo, D., Revankar, T., "Investigation of bubble breakup and coalescence in a packed-bed reactor – Part 1: A comparative study of bubble breakup and coalescence models", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 37, pp. 995-1002, (2011).
26. Doering, C.R., Spiegel, E.A., Worthing, R.A., "Laminar and Turbulent Dissipation in Shear Flow with Suction", AIP Conference Proceedings, Vol. 502, American Institute of Physics, (2000).
27. Scott, W.T., "Analytic Studies of Cloud Droplet Coalescence", Journal of the atmospheric sciences, Vol. 25, pp. 54-65, (1967).
28. Kermani, M.J., Gerber, A.G., "A General Formula for The Evaluation of Thermodynamic and Aerodynamic Losses in Nucleating Steam Flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3265–3278, (2003).
29. Hasril, H., Mohd. Zamri, Y., Norhazwani, A. M., "Numerical Modeling of Wet Steam Flow in Steam Turbine Channel", Centre for Advanced Computational Engineering, College of Engineering, University Tenaga Nasional, Malaysia, (2012).
30. Young, J.B., Bakhtar, F., "A Comparison between Theoretical Calculations and Experimental Measurements of Droplet Sizes in Nucleating Steam Flows", Department of Mechanical Engineering, University of Birmingham, (1976).
31. Zucker, R.D., "Fundamentals of Gas Dynamics", John Wiley and Sons Publication Inc., New Jersey, pp. 277-313, (2002).